
Caractérisation expérimentale d'assemblages de plaques boulonnées par mesures de champs sans contact

Evelyne Toussaint^{1,2}, Sébastien Durif^{1,2} Abdelhamid Bouchaïr^{1,2} Michel Grédiac^{1,2}

¹ Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, 63000 CLERMONT-FERRAND

² CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, 63171 AUBIERE, France

RÉSUMÉ. Les assemblages de plaques boulonnées sont largement utilisés en construction métallique. Ils permettent le transfert de différents efforts internes tels que flexion, efforts axiaux et de cisaillement. Le comportement mécanique de ces assemblages est complexe à cause du transfert d'efforts entre boulons et plaques. Cela est dû à la fois à la nature hyperstatique de la liaison, à l'évolution du contact entre les boulons et leurs trous et au comportement élastoplastique des plats métalliques constituant l'assemblage. L'interaction entre les trous d'une même plaque est aussi très importante au regard des différentes configurations des liaisons et des positions des trous. Les différents modes de ruine sont la rupture de section nette, la déformation plastique des sections brutes, le cisaillement des boulons et la pression diamétrale sur le trou de la plaque. Parmi ces modes, la pression diamétrale est la plus difficile à prédire car elle combine compression locale des trous par les boulons et cisaillement de la zone chargée située entre le trou et le bord de la plaque. De nombreuses études analysent le comportement d'assemblages de plaques en combinant des calculs par éléments finis avec des expérimentations instrumentées par un nombre limité de jauges de déformation pour estimer la distribution des déformations dans les composants des joints. Dans le présent travail, la méthode de la grille est utilisée pour analyser en détail la distribution des déformations des plaques pour différentes configurations de positions de trous chargés ou non par des boulons. Cette approche permet d'observer les champs de déformations dans une large zone autour des boulons dans les phases élastiques et plastiques. Les résultats sont utiles pour comprendre à la fois le lien entre les zones affectées par la ruine et le mode de ruine par pression diamétrale. Cette méthode peut également servir de référence pour calibrer des modèles complexes d'éléments finis.

ABSTRACT. The combination of cover-plate bolted joints commonly used in steel structures allows the transfer of various internal loads such as bending, shear or axial forces. The mechanical behavior of these joints is complex because it depends on both the contact evolution due to load transfer between bolts and holes, and the elastoplastic response of the constitutive material of the plates. The interaction between holes and plates is also of great importance regarding the various configurations of joints and holes positions. The different failure modes are the net section fracture, the gross section plastic yielding, the shear out and bearing. Among these failure modes, bearing is the more difficult to predict because it combines local compression under bolt and shear at loaded end distance of the plate. Many studies analyze the behavior of cover-plate joints by combining finite element approaches and/or experiments with limited number of strain gages to estimate the strain distribution in the components of the joints. Here the grid method is used to analyze in details the strain distribution on the plates with various configurations of bolt and hole positions. This approach enables us to observe the strain fields in the plate around the bolts during both the elastic and plastic phases of the material response. The results help understanding the evolution of the failure zones regarding mainly the bearing mode. They can also be used as a reference to calibrate complex finite element models.

MOTS-CLÉS : assemblages boulonnés, mesures de champs sans contact, méthode de la grille, distribution des déformations, analyse éléments finis

KEYWORDS: steel joint, full-field measurements, grid method, strain distribution, finite element analysis

1. Introduction

Les assemblages boulonnés sont largement utilisés en construction métallique. Un type courant est le couvre-joint attachant des éléments de structures métalliques en combinant des plaques métalliques, des semelles et/ou âmes avec boulons. Différentes combinaisons de liaisons permettent le transfert de différents efforts internes tels que flexion, efforts axiaux de traction/compression et de cisaillement. Le comportement mécanique des assemblages de plaques boulonnées est très complexe car il dépend de nombreux phénomènes tels que l'évolution du contact entre boulons et trous, le comportement élasto-plastique des matériaux constituant l'assemblage et les effets de grands déplacements qui apparaissent dans certains cas. La distribution des efforts dans les joints avec plus de deux boulons est à considérer avec le plus grand soin notamment vis-à-vis des diverses configurations de position des boulons et des trous. De nombreuses études analysent le comportement d'assemblages de type couvre-joint dans des éléments de contreventement, des continuités de semelles et d'âmes, des cornières, des tubes en aluminium ou en acier inoxydable. Elles combinent des modélisations par éléments finis et des expérimentations, les échantillons étant alors équipés avec un nombre forcément limité de jauges de déformation. De nombreuses études ont également été menées en tenant compte des grandes déformations induites par le comportement des aciers inoxydables utilisés pour les assemblages en portant le regard sur la rigidité, les résistances et les capacités à se déformer [SAL 11, BOU 08]. Dans des assemblages avec plusieurs boulons, le mode de ruine classique associe le cisaillement de bloc et la rupture en section nette. Dans ce cas, un modèle numérique peut être développé et validé par des résultats expérimentaux afin de comprendre et de prédire ce mode de ruine [HUN 06]. Pour des éléments de construction à parois minces, la contrainte ultime des assemblages boulonnés peut largement être réduite à cause des effets de déformation hors-plan qui engendrent des instabilités. Ceci est confirmé par des approches numériques en faisant varier la distance au bord et l'épaisseur des plaques [KIM 11]. Dans le travail présenté ici, la méthode de la grille est utilisée pour expliquer en détails la distribution des déformations dans toute la plaque d'assemblage pour diverses configurations des boulons et de positions des trous. Cette approche permet de déterminer les champs de déformations dans les plats autour des boulons pour les différentes phases de comportement élastique et plastique du matériau constitutif. Les dimensions des éprouvettes et les dispositions des boulons sont choisies de manière à mobiliser un mode de ruine commun et complexe qui concerne les boulons situés aux extrémités des plaques chargées (appelé pression diamétrale). Elles permettent aussi d'observer les phénomènes d'interaction entre boulons dont au moins une partie est concernée par la pression diamétrale. Les résultats obtenus permettent d'estimer la distribution des contraintes et l'évolution des zones de ruine potentielle dans les plats assemblés par boulons, en particulier vis-à-vis de la pression diamétrale. Le montage expérimental est présenté dans le premier paragraphe. Les grandes lignes de la méthode de la grille y sont également rappelées. Puis les résultats expérimentaux obtenus avec la méthode de la grille sont présentés et analysés. Pour finir, une simulation numérique avec comportement isotrope élasto-plastique est présentée et les résultats des champs de déformations sont comparés à ceux obtenus expérimentalement.

2. Dispositif expérimental et assemblages

2.1. Assemblages et conditions de chargement

Différents assemblages métalliques boulonnés ont été testés. Parmi eux, deux éprouvettes étaient constituées de trois boulons. Elles sont présentées dans ce document et les résultats expérimentaux obtenus sont analysés. Deux configurations ont été considérées : la configuration "a" avec deux boulons proches du bord haut, un boulon juste en dessous et la configuration "b" avec un boulon proche du bord haut, deux autres en dessous. A noter que le bord haut constitue la zone où la ruine en pression diamétrale est susceptible de se produire. Un schéma des deux configurations est présenté Figure 1. Afin de visualiser les zones qui sont proches des trous, les écrous sont ôtés des boulons, par conséquent les boulons ne travaillent qu'en cisaillement. Les assemblages sont testés en traction avec une machine d'essais de type SCHENCK / ZWICK- PSB250 de capacité 250 kN (voir Figure 2). Les essais ont été effectués à température ambiante, contrôlés en déplacement avec une vitesse de traverse de 0.01 mm/s. Le déplacement maximum apparent appliqué par le vérin est de 1,5 ou 4 mm selon l'assemblage testé.

2.2. Instrumentation

Les mesures de champs obtenues avec la méthode de la grille sont analysées dans ce travail. Plus particulièrement, les déplacements bidimensionnels et les champs de déformation ont été calculés en surface d'éprouvettes testées. Les grilles ont été transférées en utilisant la méthode décrite dans la référence [PIR 04]. La grille utilisée

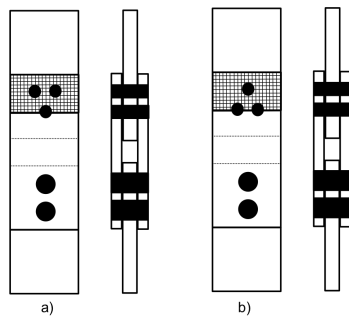


Figure 1. Vue schématique des assemblages testés (boulons en noir) : a) configuration a ; b) configuration b.

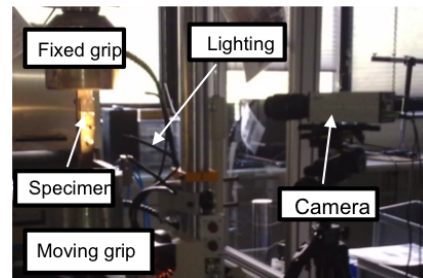


Figure 2. Montage expérimental

ici a un pas $p = 0.2 \text{ mm}$. Le signal a été encodé avec 5 pixels par période, ce qui permet d'étudier une zone d'environ $40 \times 50 \text{ mm}^2$. Une caméra SENSICAM QE ayant un capteur CCD 12 bit de taille $1040 \times 1376 \text{ pixels}$, et équipée d'un objectif SIGMA 105 mm a été utilisée pour saisir les images de la grille durant les essais. La caméra est connectée au logiciel CamWare. Durant l'essai, la grille était éclairée avec un éclairage froid qui fournissait un éclairage quasi-uniforme de la grille. Les images étaient enregistrées à la fréquence de $0.5 \text{ image/seconde}$. Il était possible de faire des moyennes temporelles des images afin de réduire le bruit des images de grille et donc celui des cartes de déplacement et de déformation. Cette moyenne temporelle sur 4 images était appliquée pour l'essai correspondant à un déplacement maximum de 1.5 mm (configuration "b", cycle 1).

Avec cette technique, les déplacements et les champs de déformation sont déduits des images de la grille prises durant l'essai en les traitant avec une Transformée de Fourier Fenêtrée (TFF). Cette transformation fournit en fait les phases et leurs dérivées du marquage quasi-régulier de la surface. Les variations de phase entre image de grille courante et image de référence sont directement proportionnelles aux déplacements dans le plan observé [SUR 00]. Les composantes de déformation et les rotations locales peuvent être obtenues simplement à partir des dérivées spatiales des phases. En pratique, la TFF est réalisée en convoluant les images de grilles avec un noyau approprié. Celui qui est utilisé ici est une enveloppe Gaussienne-2D dont l'écart type est égal à $\sigma = 5 \text{ pixels}$. En utilisant la règle classique des 3σ [GRA 06], la largeur de l'enveloppe peut être estimée à $2 \times 3 \times 5 = 30 \text{ pixels}$. La distance la plus faible entre deux mesures indépendantes étant égale à la largeur de l'enveloppe Gaussienne, cette largeur correspond à la résolution spatiale de la technique pour la mesure des déformations. En éliminant les défauts de marquage qui apparaissent de façon inévitable quand les grilles sont imprimées sur leur support [BAD 09b], on peut obtenir un très bon compromis entre résolution et résolution spatiale. Une résolution typique est de quelques centaines de microdéformations pour une résolution spatiale de 30 pixels , soit 1.2 mm . Ceci représente la taille de la jauge de déformation optique équivalente qui serait collée en chaque pixel de l'image. Une particularité de cette technique est que les composantes de déplacements et de déformations sont calculées pour chaque pixel, permettant donc de détecter des phénomènes très locaux. Il faut cependant noter que ces quantités mesurées ne sont pas indépendantes d'un pixel à un autre car les mesures de phase et leurs dérivées sont effectuées à chaque pixel en se basant sur les informations contenues dans les pixels voisins.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement global

Les courbes réponse force-déplacement de traverse sont présentées figure 3. Pour la configuration "b", deux cycles ont été effectués (voir figure 3b) alors qu'un seul cycle est effectué pour la configuration "a" (voir figure 3a). Les courbes montrent une première phase de mise en place, due à l'évolution du contact entre les boulons et les trous, suivie d'une partie linéaire qui représente un comportement principalement élastique et d'une partie non-linéaire représentant l'évolution des zones plastiques dans les trous et leurs zones limitrophes. L'effort maximum est de l'ordre de 175 kN pour la configuration "a" et de 156 kN pour la configuration "b". Le début du premier cycle de la configuration "b" montre d'abord qu'il y a des rattrapages de jeu des différentes parties de l'assemblage avant l'application du chargement réel. Ces courbes sont utilisées principalement pour capter les valeurs des grandes transformations dans les plaques avec trous chargées par boulons, telles que la fin de la partie linéaire et le plateau ultime. A noter qu'un des objectifs principaux de l'étude est d'observer les évolutions des déformations

dans les zones d'assemblages à différents niveaux de chargement en utilisant une technique de mesure de champs, comparée à la modélisation MEF.

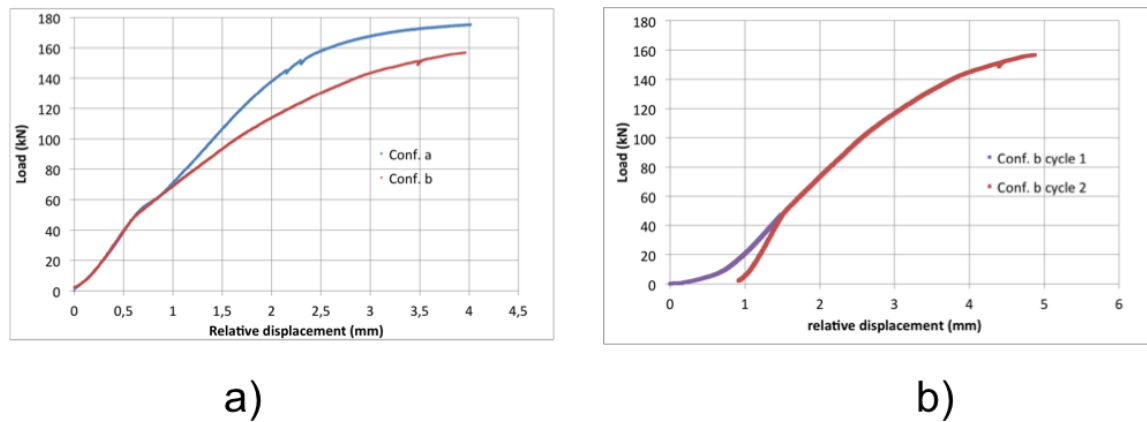


Figure 3. Courbes réponse force-déplacement : a) configuration a ; b) configuration b.

3.2. Cartes de déplacements et de déformations

La figure 4 présente des champs de déplacements typiques horizontaux et verticaux, mesurés pour la configuration "b" cycle 2, pour un chargement de 156 kN. Les dimensions sont données en pixels (1 pixel = 40 μm). On distingue clairement sur la figure 4a) que le chargement n'est pas symétrique. Il est plus important sur la partie gauche de l'assemblage. La figure 4b) permet également de visualiser que l'assemblage se déplace horizontalement vers la gauche. Des cartes similaires (non présentées ici) sont obtenues pour la configuration "a".

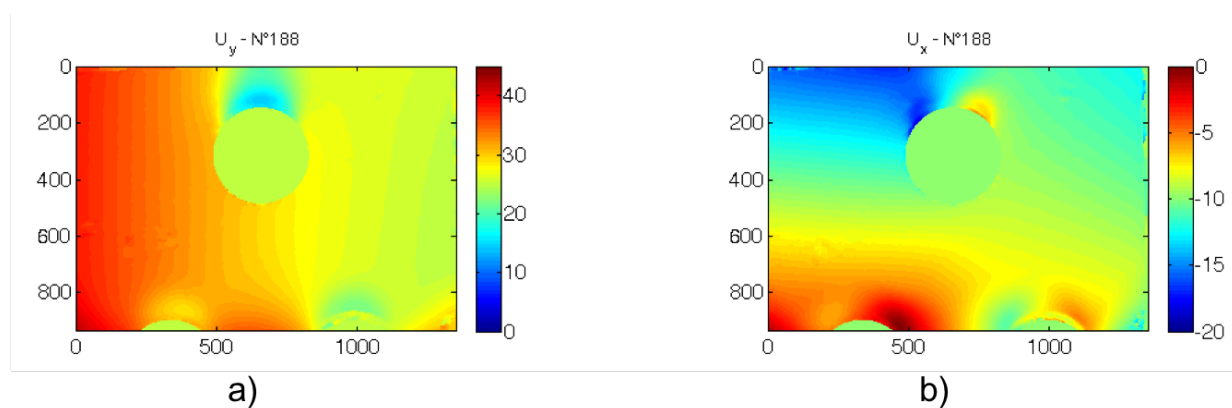


Figure 4. Cartes de déplacement pour la configuration "a" ($F=156 \text{ kN}$) : a) déplacement vertical ; b) déplacement horizontal

Les composantes de déformation sont calculées en suivant la procédure décrite dans [BAD 09a]. Les figures 5 et 6 présentent les cartes de déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} pour les configurations "a" et "b" à la fin du chargement. On distingue clairement les zones de contact entre les boulons et les plaques ainsi que les interactions entre les lignes de boulons, notamment pour la configuration "a". En particulier, les cartes de déformations ε_{xx} , ε_{yy} autour des trous montrent la répartition entre zones de tension et de compression dans les plaques.

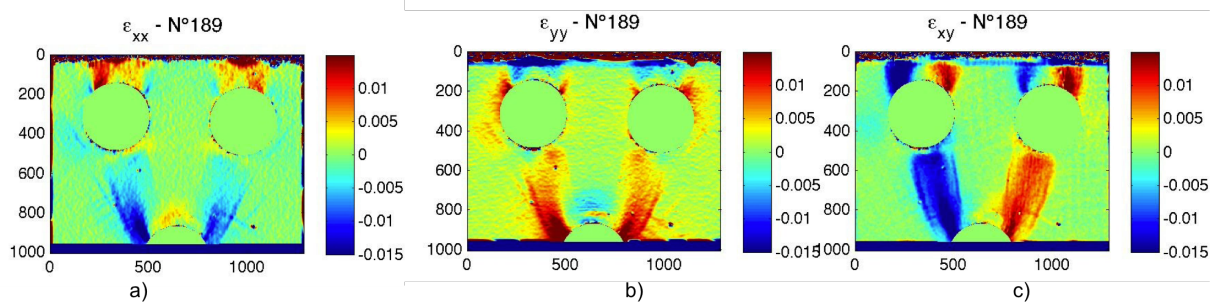


Figure 5. Cartes de déformation pour la configuration "a" ($F=175$ kN) : a) déplacement vertical ; b) déplacement horizontal

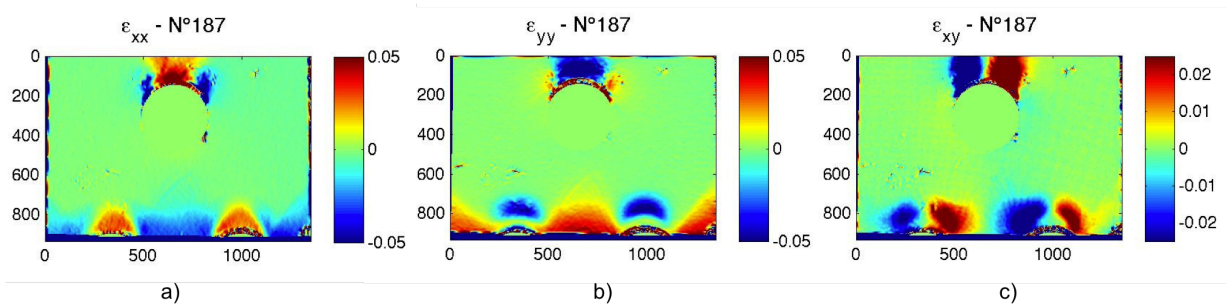


Figure 6. Cartes de déplacement pour la configuration "b" ($F=156$ kN) : a) déplacement vertical ; b) déplacement horizontal

4. Simulations numériques

L'objectif des simulations est de comparer les cartes de déformations expérimentales avec celles obtenues par simulations éléments finis. Le modèle considéré pour la configuration "a" est présenté figure 7.

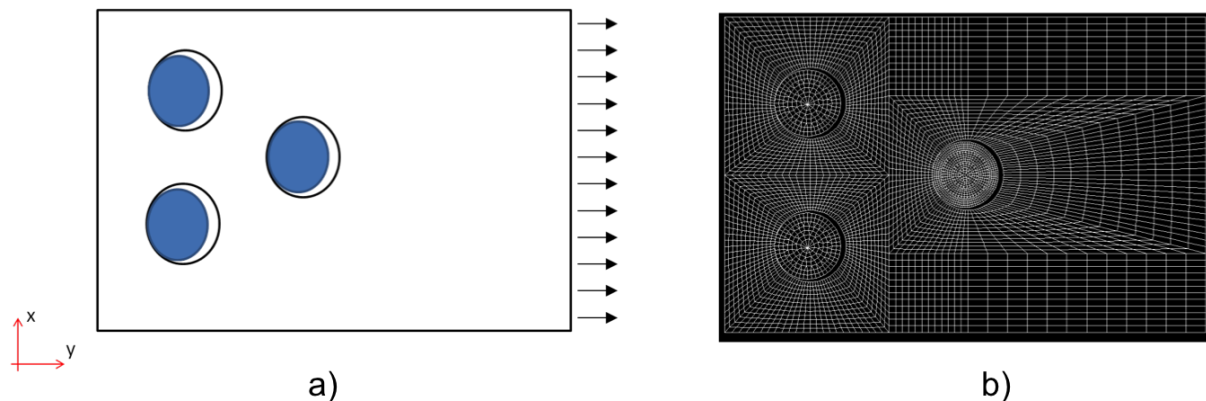


Figure 7. Définition du modèle éléments finis utilisé pour la configuration "a".

Compte tenu des dimensions des plats qui composent l'assemblage, la modélisation 2D est effectuée en contraintes planes. Le contact unilatéral entre le boulon et le trou, géré en utilisant l'opérateur IMPO de Cast3m, est pris en compte sans frottement. Les non-linéarités matérielles (élastoplasticité) et géométriques (grands déplacements) sont considérées. Des éléments finis quadrangulaires linéaires à 4 noeuds sont choisis pour une meilleure gestion du contact. Tous les plats modélisés sont en acier dont la courbe de traction réelle, intégrée dans le modèle, est déterminée en prélevant des éprouvettes dans les plaques utilisées. Pour simplifier la gestion du contact et les tailles des problèmes, chaque plaque d'assemblage est décomposée en deux parties correspondant à deux zones d'assemblages (figure 8). La première zone qui correspond à celle observée expérimentalement (grilles de mesure) est

choisie avec une faible résistance pour y localiser les déformations plastiques. La deuxième zone est celle du montage expérimental qui vient se fixer sur la machine d'essais. Le chargement appliqué correspond à une distribution uniforme sur la largeur de chaque plaque modélisée.

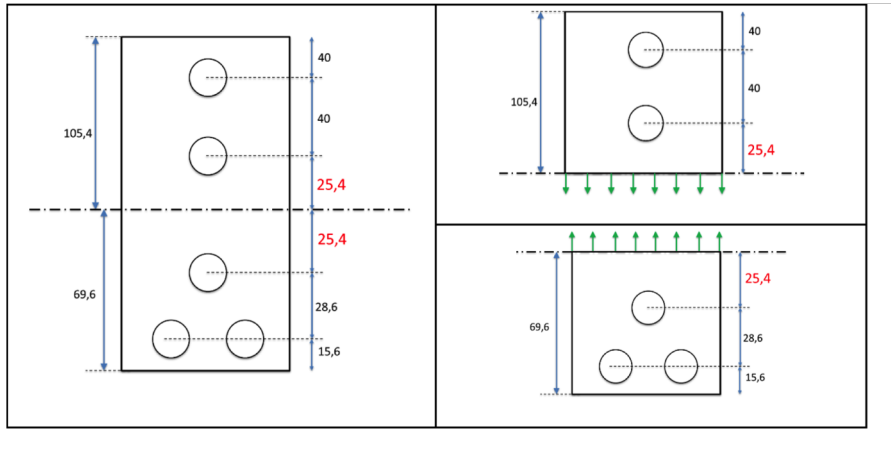


Figure 8. Exemple de décomposition d'une plaque testée (gauche) en 2 plaques à modéliser (droite) (config. b)

Les plaques sont maintenues en déplacement latéral sur 2 points placés sur la ligne médiane et les boulons sont bloqués en déplacements (U_x , U_y) sur l'ensemble de leurs noeuds (Figure 9). Les boulons ont des limites d'élasticité largement supérieures à celles des plaques attachées pour limiter les zones de déformation aux plaques et leurs trous.

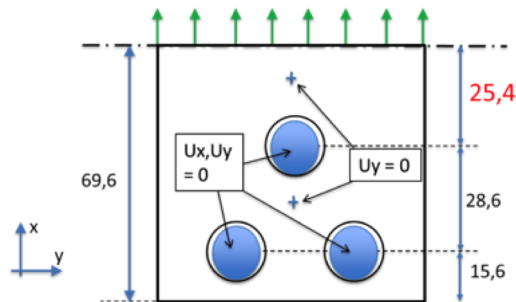


Figure 9. Illustration des conditions aux limites d'une plaque avec boulons

Un exemple représentatif de cartes de déformations obtenues par simulation numérique est présenté figure 10. Les tendances observées sont les mêmes que pour les résultats expérimentaux mais des différences existent cependant du fait que la symétrie n'est pas parfaitement respectée pour les essais. Ces différences entre résultats numériques et expérimentaux soulignent la pertinence des mesures de champs sans contact et particulièrement dans un contexte de forts gradients de déformations.

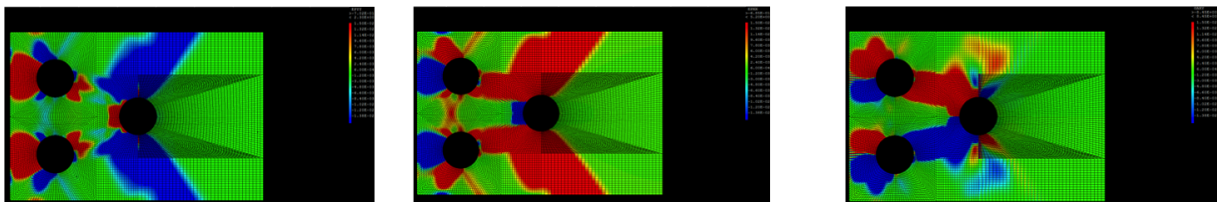


Figure 10. Cartes de déformations numériques correspondant à un effort de 155 kN pour la configuration "a" : a) ε_{xx} , b) ε_{yy} , c) ε_{xy}

5. Conclusion

L'objectif de cette étude est d'étudier l'interaction des trous, entre eux et vis-à-vis des bords, dans les plats d'assemblages métalliques boulonnés. Plusieurs configurations dont deux avec trois boulons ont été testées. Les mesures de champs sans contact ont permis d'obtenir des informations à la fois qualitatives et quantitatives concernant i) les mécanismes de déformations autour des trous des plats et ii) l'interaction entre les trous. Cette étude expérimentale a été comparée à des simulations par éléments finis. Les mêmes tendances ont été observées entre cartes numériques et expérimentales. Cependant, les différences qui ont été relevées soulignent la pertinence des mesures de champs sans contact pour étudier ce type de sous-structures hyperstatiques. Finalement, cette première étude ouvre de nouvelles perspectives pour analyser et comprendre de façon fine les mécanismes de déformation, en limitant le nombre de jauges de déformations et également en donnant des informations détaillées pour une meilleure compréhension du comportement de tels assemblages. Après avoir montré la pertinence et l'efficacité de la démarche développée dans le cadre de cette étude, les travaux seront étendus et combinés à des mesures globales plus fines dans différentes zones de l'assemblage, en vue de maîtriser les évolutions des déformations locales et globales dans les assemblages avec diverses configurations géométriques.

6. Bibliographie

- [BAD 09a] BADULESCU C., GRÉDIAC M., MATHIAS J.-D., « Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement », *Measurement Science and Technology*, vol. 20, p. 1–17, 2009.
- [BAD 09b] BADULESCU C., GRÉDIAC M., MATHIAS J.-D., ROUX D., « A procedure for accurate one-dimensional strain measurement using the grid method », *Experimental Mechanics*, vol. 49, p. 841–854, 2009.
- [BOU 08] BOUCHAÏR A., AVERSENG J., ABIDELAH A., « Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, p. 1264–1274, 2008.
- [GRA 06] GRAFAREND E. W., *Linear and Nonlinear Models : Fixed Effects, Random Effects, and Mixed Models*, Walter de Gruyter ISBN-13 : 978-3-11-016216- 5, 2006.
- [HUN 06] HUNS B., GRONDIN G., DRIVER R., « Tension and shear block failure of bolted gusset plates », *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, p. 395–408, 2006.
- [KIM 11] KIM T. S., KUWAMURA H., « Numerical investigation on strength design and curling effect of mechanically fastened joints in cold-formed austenitic stainless steel », *Materials and Design*, vol. 32, p. 3942–3956, 2011.
- [PIR 04] PIRO J.-L., GRÉDIAC M., « Producing and transferring low-spatial-frequency grids for measuring displacement fields with moiré and grid methods. », *Experimental Techniques*, vol. 28, p. 23–26, 2004.
- [SAL 11] SALIH E., GARDNER L., NETHERCOT D., « Bearing failure in stainless steel bolted connections », *Engineering Structures*, vol. 33, p. 549–562, 2011.
- [SUR 00] SURREL Y., *Fringe Analysis*, P.K. Rastogi (Ed) : Photomechanics, 2000.